

УДК 621.165

В. П. Субботович, д-р техн. наук

А. В. Лапузин, канд. техн. наук

С. А. Темченко, канд. техн. наук

А. Ю. Юдин, канд. техн. наук

Ю. А. Юдин, канд. техн. наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
(г. Харьков, E-mail: yury55yudin@ukr.net)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫХЛОПНЫХ ПАТРУБКОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В настоящее время в Украине многие паротурбинные блоки работают в широком диапазоне режимов, включая режимы существенно пониженных объемных расходов пара через последнюю ступень турбины. Актуальными проблемами газодинамики современных выхлопных патрубков (ВП) паровых турбин являются отрывные течения на обводах диффузора. На режимах последней ступени турбины, близких к номинальному режиму, нестабильное поведение потока характерно для внешнего обвода диффузора, а именно: отрывы потока и переменное положение скачка уплотнения. Для режимов пониженных объемных расходов характерны подъем линий тока и образование вблизи внутреннего обвода диффузора зоны отрывного течения.

На кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» выполнен большой объем экспериментальных и расчетных исследований ВП паровых турбин в широком диапазоне изменения нагрузок последней ступени. Новые сведения о характеристиках течения позволили разработать ряд рекомендаций по совершенствованию диффузорных элементов ВП. Определены следующие направления повышения эффективности ВП:

- использование импульса утечки рабочего тела над бандажом рабочего колеса последней ступени;
- рациональное формирование геометрии внешнего обвода диффузора с учетом особенностей работы последней ступени на околозвуковых режимах;
- организация специального вдува потока, источником которого является влажнопаровая смесь, специально удаляемая для снижения влажности в периферийной зоне последней ступени;
- применение за последней ступенью стационарного широкорежимного дефлектора.

При использовании утечки над бандажом рабочего колеса последней ступени необходимо учитывать тот факт, что на некоторых режимах возможно образование области сверхзвукового течения вблизи внешнего обвода диффузора, связанное со скоростью утечки и изменением кривизны обвода. Сверхзвуковая область ограничивается скачком уплотнения, интенсивность которого определяется режимом работы последней ступени. Скачок уплотнения, примыкающий к наружному обводу диффузора, вызывает отрыв пограничного слоя и влияет на характеристики течения во всем объеме диффузора, которые в свою очередь определяют положение скачка. Поэтому положение скачка уплотнения является неустойчивым. За условным первоначальным положением скачка поток отрывается от наружного обвода на максимальном удалении от бандажу. Затем скачок движется вверх по потоку и, когда он приближается к бандажу, интенсивность его уменьшается, а зона отрыва потока перемещается в сторону выходного сечения диффузора, что приводит к снижению коэффициента полных потерь диффузора и давления на входе в него. Это снова приводит к ускорению сверхзвукового потока, который замыкается скачком уплотнения в месте его

условного первоначального положения. Далее процесс повторяется. Определены колебательные движения скачка уплотнения с частотами 100-170 Гц, которые могут вызывать возбуждение колебаний рабочих лопаток последней ступени, снижая их вибрационную надежность.

При разработке новых и модернизации существующих конструкций паровых турбин число Маха на выходе из последней ступени может достигать 0,8 – 1,0. Нагрузка на последнюю ступень и выхлопной патрубок значительно увеличивается вследствие сезонного снижения давления в конденсаторе и/или при отключении теплофикационного отбора. При больших числах Маха может возникнуть эффект «запирания» выходного патрубка, когда начинается резкий рост коэффициента полных потерь, а число Маха на входе в диффузор становится фиксированным. Определено, что форма внешнего обвода существенно влияет на характеристики ВП. Установлено, что на дозвуковых режимах диффузор с непрерывным наружным обводом и без кольцевой лопатки имеет безотрывное течение и существенно меньшие значения коэффициентов потерь по сравнению с диффузором с уступом на наружном обводе и кольцевой лопаткой, как у ВП турбины К-325-23,5. На околосвуковых скоростях коэффициенты полных потерь обоих исследованных диффузоров – с непрерывным обводом и с уступом на обводе – увеличиваются до значений, превышающих 1, и имеют близкие значения, а коэффициенты потерь внутренних и с выходной скоростью существенно отличаются. Следует также отметить, что в исследованном диапазоне режимов работы для диффузора с уступом на наружном обводе и кольцевой лопаткой нестационарных режимов, которые связаны с колебаниями скачка уплотнения на внешнем обводе диффузора, не обнаружено.

В диффузорных выхлопных патрубках одним из эффективных способов управления потоком для снижения полных потерь является ускорение потока в пограничном слое на внешнем обводе диффузора. В современных паровых турбинах для этого используют специальный вдув потока, источником которого является влажнопаровая смесь, удаляемая из периферийной зоны последней ступени. При выборе размеров выходной щели кольцевого канала на наружном обводе диффузора в окружном направлении необходимо учитывать пространственный характер течения рабочего тела в диффузоре и корпусе выхлопного патрубка с односторонним выходом пара в конденсатор. Проведенные исследования показали, что величина оптимального импульса струи пара из выходной щели, взаимодействующей с основным потоком, зависит от угла поворота потока в диффузоре. Поэтому предлагается выполнить переменным в окружном направлении размер выходной щели, которая сужается в верхней и расширяется в нижней частях корпуса выхлопного патрубка, сохраняя неизменной площадь щели. Такой подход не изменяет уровень эрозионной надежности последней ступени, снижает окружную неравномерность давления за последней ступенью в два раза и уменьшает коэффициент полных потерь выхлопного патрубка на 12%.

Снижение объемных расходов пара через последнюю ступень турбины сопровождается существенными изменениями характера течения, как в самой ступени, так и в ВП. Для повышения эффективности работы отсека «последняя ступень - диффузор ВП» на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» предложено использовать широкорежимный кольцевой дефлектор. Расчетным и экспериментальным путями установлено, что для каждого режима работы последней ступени имеется своя рациональная форма широкорежимного дефлектора, которая обеспечивает минимизацию коэффициента полных потерь ВП. На режимах работы последней ступени, близких к номинальному режиму, рациональной является криволинейная форма, выбранная с учетом геометрии линий тока, характерной для этих режимов. На режимах пониженных объемных расходов рабочего тела предлагается использовать коническую форму дефлектора, что позволяет существенно снизить коэффициент полных потерь ВП и уменьшить размеры привтулочной циркуляционной зоны.